



Distribusi Spasial Kekeringan pada Perkebunan Kelapa Sawit berdasarkan Citra Landsat

Spatial Distribution of Dryness on Oil Palm Plantations Using Landsat image

Melda Hazrina* dan Idung Risdiyanto

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Gedung FMIPA, IPB, Jl. Meranti Wing 19 Lv.4 Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 May 2018

Received in revised from 28

September 2018

Accepted 2 November 2018

doi: 10.29244/j.agromet.32.2.51-61

Keywords:

Drought index

Remote sensing

Soil moisture

Surface temperature

Vegetation index

ABSTRACT

Peatland in Riau is commonly utilized for agricultural purposes including oil palm. This utilization has influenced on peat characteristics on the top soil leading to degraded peatland, associated drought-related fire. In this paper, we identified peat dryness from three different oil palm ages using drought indices proxy to derive information on spatial dryness. Two drought indices were used in this study including the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the Crop Water Stress Index (CWSI). Our results showed that the TVDI value ranged from 0.46 to 0.92, while the CWSI value ranged from 0.18 to 0.80. The highest value of TVDI was found in 2-years old oil palm, and the lowest values was in the 11-years old oil palm. Our CWSI analysis confirmed this pattern that young oil palm has a high moisture stress, as many peat-soils were exposed to direct sunlight. Our findings also revealed that the TVDI and the CWSI were able to interpret soil moisture dynamics on the top layers (10 cm).

PENDAHULUAN

Kebakaran hutan merupakan salah satu permasalahan global yang sering terjadi pada musim kemarau (Doerr dan Santín, 2016; Flannigan et al., 2013; Knorr et al., 2016; Turetsky et al., 2014). Dampak negatif dari kebakaran hutan terhadap lingkungan antara lain asap kebakaran (Field et al., 2016; Hayasaka et al., 2014; Henderson dan Johnston, 2012; Reid et al., 2016), pelepasan stok karbon hutan (Hirano et al., 2014; Huijnen et al., 2016; Reddy et al., 2015), dan penurunan keragaman biodiversitas (Kelly et al., 2015; Silveira et al., 2016). Kebakaran hutan sering terjadi pada lahan gambut di wilayah Indonesia, terutama pada periode El-Niño (Taufik et al., 2017; Yustiawati et al., 2015). Lahan gambut di Indonesia sekitar 14.91 juta hektar yang tersebar pada tiga pulau utama, yaitu Sumatera 6.44 juta hektar, Kalimantan 4.78 juta hektar, dan Papua 3.69 juta hektar (Osaki dan Tsuji, 2016).

Gambut merupakan jenis tanah kaya bahan organik (paling sedikit 65% bahan organik), terbentuk akibat penumpukan vegetasi yang telah mati dan melapuk dalam jangka waktu yang lama. Tingkat

porositas lahan gambut relatif tinggi, sehingga mampu menyimpan air lebih banyak dibanding dengan jenis tanah yang lain. Ciri khas gambut yaitu bersifat *irreversible drying*. Sifat ini sangat rentan terhadap kekeringan dan kebakaran, karena sekali mengalami kekeringan, maka tidak dapat kembali mengikat air (Nursyamsi et al., 2016; Thorburn dan Kull, 2015).

Identifikasi wilayah lahan gambut yang berpotensi terbakar atau mengalami kekeringan dapat dilakukan dengan metode penginderaan jauh (AghaKouchak et al., 2015; Bai et al., 2017; Zhang dan Jia, 2013). Metode ini dapat memberikan kemudahan dalam mengidentifikasi kejadian kekeringan lahan pada wilayah yang luas menggunakan data citra satelit. Nilai *spectral radiance* setiap data citra satelit dapat dikombinasikan untuk mendapatkan informasi potensi kekeringan yang dinyatakan dalam bentuk indeks. Indeks kekeringan sangat bervariasi berdasarkan *band* yang digunakan untuk penyusunan nilai indeks tersebut. Indeks kekeringan yang umum digunakan antara lain *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Dutta et al., 2015; Mu et al., 2012), *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (Campos et al., 2012; Gu

* Corresponding author: melda.hazrina@gmail.com

et al., 2007), *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) (Liang et al., 2014; Sandholt et al., 2002), dan *Crop Water Stress Index* (CWSI) (Bai et al., 2017; Çolak et al., 2015). Penggunaan indeks tersebut tergantung pada tujuan dari kegiatan penelitian. Pada studi ini indeks TVDI dan CWSI akan coba diaplikasikan untuk menilai kekeringan pada lahan gambut tropis, mengingat aplikasi kedua indeks tersebut masih jarang dilakukan untuk gambut Indonesia.

Nilai TVDI merupakan salah satu indikator kekeringan yang dikembangkan pertama kali untuk lahan pertanian (Bai et al., 2017). TVDI dihitung berdasarkan selisih nilai suhu permukaan (T_s) ketika kondisi basah dan kondisi kering pada tiap tutupan lahan (nilai indeks vegetasi tertentu), sehingga dapat memberikan informasi perkiraan kekeringan dalam skala regional (Chen et al., 2011; Sandholt et al., 2002). Sedangkan CWSI merupakan indeks kekeringan yang diturunkan dari komponen neraca energi atau besar fraksi evapotranspirasi yang terjadi di suatu lahan. Nilai CWSI yang disusun dari komponen neraca radiasi, diperoleh dari perbandingan fluks bahang laten (LE) terhadap selisih radiasi netto (R_n) dengan fluks bahang tanah (G) (Cammalleri et al., 2013; Sun et al., 2005). Sedangkan nilai CWSI dengan komponen fraksi evapotranspirasi, diperoleh dari perbandingan evapo-

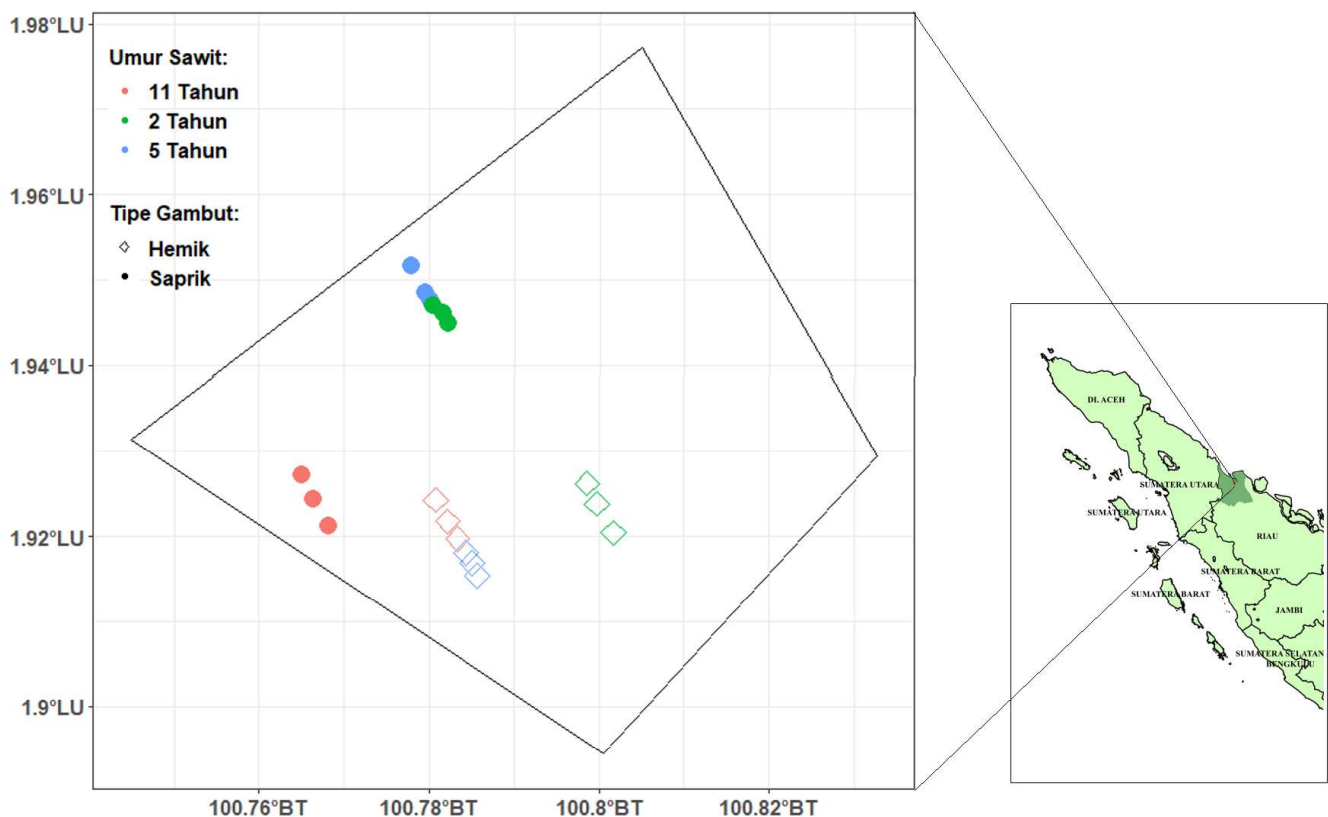
transpirasi aktual terhadap evapotranspirasi potensial yang diukur pada kondisi lingkungan yang sama.

Penelitian ini menggunakan data lapang yang diambil dari area perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Rokan Hilir, Provinsi Riau. Pada area tersebut sering mengalami kekeringan dan kebakaran lahan, yang berakibat pada penurunan produktivitas kelapa sawit. Berdasarkan kajian yang lalu, citra satelit dapat bermanfaat untuk mendeteksi kekeringan, sehingga aplikasi data citra tersebut sangat relevan dan bermanfaat untuk mendukung perkebunan sawit yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan (i) mengidentifikasi sebaran potensi kekeringan berdasarkan perhitungan TVDI dan CWSI dengan memanfaatkan data citra satelit Landsat 8, dan (ii) membandingkan kedua indeks kekeringan dengan data observasi kelembaban tanah di wilayah kajian.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan data lapang dari perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Rokan Hilir, Riau (Gambar 1). Pengambilan data lapang dilakukan pada bulan April dan Mei 2018.



Gambar 1 Lokasi pengambilan data lapang di perkebunan kelapa sawit Kabupaten Rokan Hilir, Riau. Sebanyak 18 titik pengamatan dibuat di lapang untuk pengambilan data tanah dan cuaca. Pengukuran dilakukan pada dua jenis kematangan gambut (hemik-bentuk belah ketupat, saprik-bentuk lingkaran), dan tiga kelas umur tanaman (2 tahun-hijau, 5 tahun-biru, 11 tahun-merah).

Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, yaitu citra satelit Landsat 8 OLI/TIRS path/row 127/59 dengan tanggal akuisisi 6 Mei 2018. Data tersebut tersedia *online* melalui: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Kemudian data lapang dari 18 titik pengamatan tanah dan cuaca yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Variabel yang diukur di lapang pada 18 titik pengamatan.

Data	Satuan
Suhu Permukaan	($^{\circ}\text{C}$)
Kelembaban relatif	(%)
Suhu udara	($^{\circ}\text{C}$)
Suhu tanah	($^{\circ}\text{C}$)
Kecepatan angin	(m/s)
Kelembaban tanah	(% volume)

Pengambilan Data Lapang

Pengambilan data observasi di wilayah kajian menggunakan metode *purposive sampling*, sehingga diharapkan sampel mampu mewakili kondisi lahan. Instrumen yang digunakan dalam kegiatan lapang disajikan pada Tabel 2. Sampel data lapang dibagi

berdasarkan dua tingkat kematangan gambut, yaitu gambut saprik dan hemik, dan menurut tiga jenis umur tanam, yaitu 2 tahun, 5 tahun, dan 11 tahun (Gambar 1). Data setiap kombinasi jenis kematangan gambut dan umur kelapa sawit dihasilkan dari tiga lokasi/titik pengamatan. Pengamatan dilakukan pada tiga waktu, yaitu pagi (07.00-10.00), siang (12.00-15.00), dan sore (15.00-18.00). Suhu dan kelembaban tanah diukur pada empat kedalaman berbeda meliputi 5 cm, 10 cm, 20 cm, dan 30 cm. Untuk mendapatkan suhu permukaan, pengukuran dilakukan pada 0 cm (permukaan tanah).

Pengolahan Data Citra Satelit

Tahapan pengolahan data citra terdiri atas: (i) Menentukan area citra yang sesuai dengan wilayah kajian. Proses ini dapat meliputi *cropping* citra sehingga ukuran file data lebih kecil dan memudahkan proses pengolahan; (ii) Melakukan klasifikasi tutupan lahan dengan metode klasifikasi terbimbing, dengan *training area* pada tiap jenis tutupan lahan. Penelitian ini mengklasifikasikan wilayah kajian menjadi tiga jenis tutupan lahan, yaitu kelapa sawit berumur 2 tahun, 5 tahun dan 11 tahun. (iii) Menghitung nilai indeks kekeringan dengan metode TVDI dan CWSI.

Tabel 2 Alat pengambilan data lapang.

Peralatan		Kegunaan
Peralatan navigasi dan orientasi	GPS	Menentukan titik sampel yang digunakan.
Peralatan pengukuran	<i>Infrared Thermometer</i>	Mengukur suhu permukaan di titik pengamatan.
	<i>AWS (Automatic Weather Station)</i>	Mengukur iklim global di lokasi pengamatan.
	<i>Soil Moisture</i>	Mengukur kelembaban tanah
	Thermokopel	Mengukur suhu tanah.

Penurunan parameter fisik data citra Landsat 8

1. Konversi *Digital Number* menjadi *Spectral Radiance*

Nilai *Digital Number* (DN) data satelit dapat dikonversi menjadi *Spectral Radiance* (L_{λ}) dengan menggunakan Persamaan (1) (USGS, 2016).

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

dimana L_{λ} adalah *spectral radiance* ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$), M_L adalah *radiance multiplicative scaling band ke-i*, Q_{cal} merupakan nilai *digital number band ke-i*, dan A_L adalah *radiance additive scaling band ke-i*. L_{λ} digunakan untuk menghitung suhu kecerahan, radiasi gelombang pendek yang keluar (R_s out), dan albedo (α).

2. Perhitungan Suhu Permukaan (TS)

Suhu kecerahan atau *Brightness Temperature* (T_B) adalah intensitas radiasi termal yang diemisikan

sebuah objek dalam satuan suhu, dan dapat dihitung menggunakan Persamaan (2). Nilai-nilai *thermal constant* tersedia dalam metadata Satelit Landsat 8 (USGS, 2016).

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2)$$

dimana T_B adalah suhu kecerahan (K), nilai konstanta kalibrasi *spectral radiance* (K_1) *band 10* = 774.89 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) dan konstanta kalibrasi suhu absolut (K_2) *band 10* = 1321.08 K. Nilai K_1 dan K_2 pada *band 11* masing-masing adalah 480.88 ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) dan 1201.14 K. Nilai T_B digunakan untuk menduga suhu permukaan (TS), yaitu suhu yang terukur pada bagian permukaan suatu objek. TS dihitung dengan Persamaan (3) (USGS, 2016).

$$T_S = \frac{T_B}{\left(1 + \frac{\lambda T_B}{\rho} \ln \epsilon\right)} \quad (3)$$

dimana TS suhu permukaan (K), TB suhu kecerahan (K), λ panjang gelombang emisi radiasi ($11.5 \mu\text{m}$), δ diperoleh dari perhitungan hc/σ , h konstanta Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$), c kecepatan cahaya ($2.98 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), σ konstanta Stefan Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), dan ϵ emisivitas.

3. Perhitungan Fluks Bahang Tanah (G)

Nilai fluks bahang tanah adalah fungsi dari radiasi netto, suhu permukaan, albedo, dan indeks kehijauan (NDVI). Fluks bahang tanah dapat dihitung dengan Persamaan (4) (Wiweka, 2014).

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98\text{NDVI}^4) \quad (4)$$

4. Perhitungan Fluks Bahang Terasa (H)

Fluks bahang terasa adalah fungsi dari komponen-komponen neraca energi permukaan dan *bowen ratio* (Wiweka, 2014). Fluks bahang terasa dihitung dengan menggunakan Persamaan (5). Nilai β untuk wilayah pemukiman 4, badan air 0.11 (Wiweka, 2014), semak 0.93, dan hutan 0.23 (Fisch et al., 2004).

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (5)$$

5. Perhitungan Fluks Bahang Laten (LE)

Fluks bahang laten adalah jumlah energi radiasi matahari yang digunakan untuk menguapkan air ke atmosfer. Fluks bahang laten dihitung menggunakan Persamaan (6) (Wiweka, 2014).

$$LE = R_n - H - G \quad (6)$$

6. Perhitungan *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI)

Perhitung nilai TVDI menggunakan Persamaan (7) (Gao et al. 2011; Chen et al. 2011; Du et al. 2017). Nilai TVDI berkisar antara 0 hingga 1 (Sandholt et al. 2002). TVDI bernilai 1 merupakan tepi kering yang menunjukkan akses air terbatas atau tidak adanya penguapan dari tanah dan TVDI bernilai 0 merupakan tepi basah yang menunjukkan evapotranspirasi maksimum dan akses air yang tidak terbatas.

$$\text{TVDI} = \frac{T_s - T_{s_{\min}}}{T_{s_{\max}} - T_{s_{\min}}} \quad (7)$$

dimana TS merupakan suhu permukaan spasial dari pengukuran data satelit; $T_{s_{\min}}$ dan $T_{s_{\max}}$ adalah suhu permukaan minimum dan maksimum pada tutupan lahan tertentu.

7. Perhitungan *Crop Water Stress Index* (CWSI)

Nilai CWSI adalah fungsi perbandingan evapotranspirasi aktual terhadap evapotranspirasi potensial, atau perbandingan fluks bahang laten (LE) terhadap selisih radiasi netto (R_n) dengan fluks bahang tanah (G)

(Sun et al., 2005). CWSI dapat dihitung menggunakan Persamaan (8).

$$\text{CWSI} = 1 - \frac{ET_p}{ET_a} \approx 1 - \frac{LE}{R_n - G} \quad (8)$$

dimana ET_p evapotranspirasi potensial (mm hari^{-1}), ET_a evapotranspirasi potensial (mm hari^{-1}), LE fluks bahang laten (Wm^{-2}), R_n radiasi netto (Wm^{-2}), G fluks bahang tanah (Wm^{-2}).

Perhitungan nilai evapotranspirasi potensial

Food and Agriculture Organization (FAO) merekomendasikan metode Penman-Monteith untuk menentukan evapotranspirasi potensial (ET_p). Nilai ET_p merupakan fungsi dari parameter-parameter cuaca, dan dapat dihitung dengan Persamaan (9) (Allen et al., 1998).

$$ET_p = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (9)$$

Dimana:

ET_p	: Evapotranspirasi potensial (mm hari^{-1})
LE	: Fluks bahang laten ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$)
R_n	: Radiasi netto ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$)
G	: Fluks bahang tanah ($\text{MJ m}^{-2} \text{ hari}^{-1}$)
Δ	: Gradien tekanan uap air jenuh terhadap suhu udara ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
γ	: Konstanta psikrometri ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
u_2	: Kecepatan angin (m/s)
$e_a - e_s$: Defisit tekanan uap air (kPa)
T	: Suhu udara ($^\circ\text{C}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Lingkungan Fisik Wilayah Kajian

Wilayah kajian terletak di Kabupaten Rokan Hilir, Provinsi Riau, dengan ketinggian kurang dari 50 m di atas permukaan laut. Jenis tanah wilayah kajian adalah tanah gambut. Tingkat kematangan gambut di wilayah kajian terdiri atas hemik, dan saprik. Tanaman kelapa sawit dengan tumbuhan liar jenis pakis dan *Leguminous Cover Crop* (LCC) mendominasi tutupan vegetasi di wilayah kajian. Tutupan lahan di wilayah kajian dibagi menjadi lahan kelapa sawit umur 2 tahun, 5 tahun, 11 tahun, badan air, dan perumahan. Wilayah kajian beriklim tropis dengan suhu udara berkisar antara $22-36^\circ\text{C}$ dan rata-rata kelembaban udara sebesar 77%.

Suhu Tanah dan Kelembaban Tanah

Hasil pengukuran suhu tanah pada kedalaman 5 cm, 10 cm, 20 cm, dan 30 cm dalam rentang waktu pagi hingga sore hari masing masing berkisar antara $21.5-36.3^\circ\text{C}$, $20.9-34.7^\circ\text{C}$, $19-33.1^\circ\text{C}$, dan $24.5-33.8^\circ\text{C}$. Perubahan suhu tanah terhadap kedalaman untuk

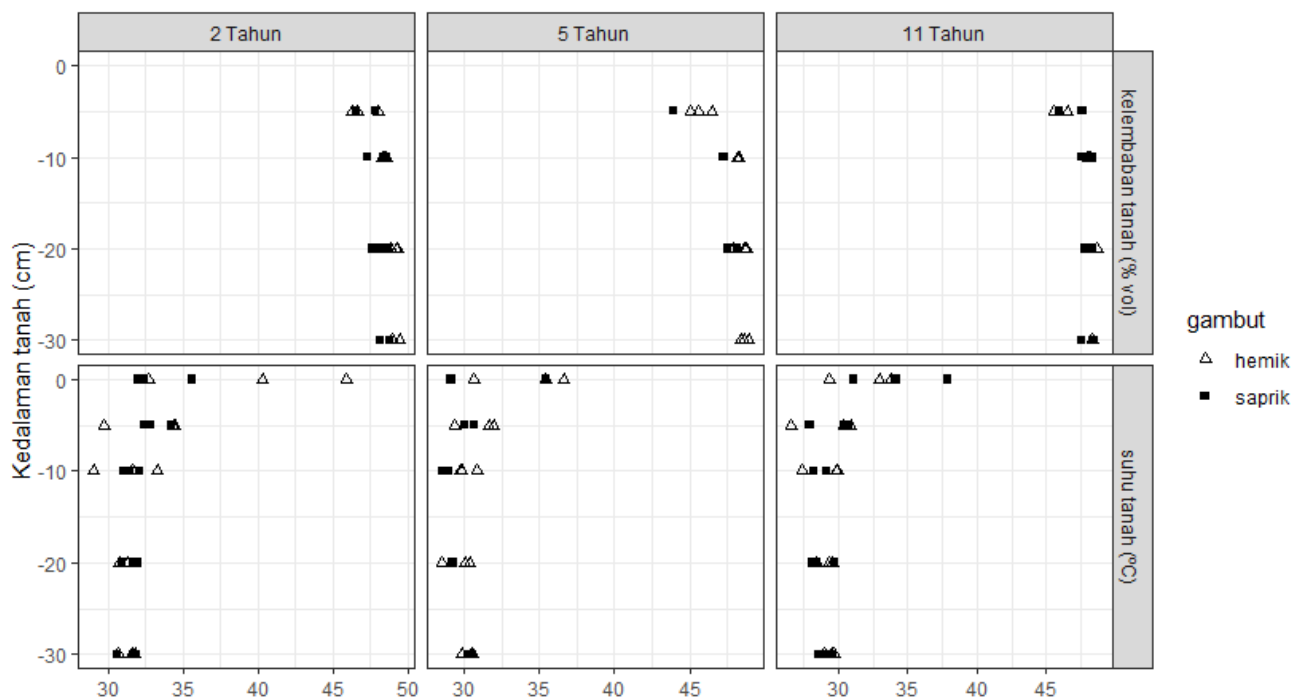
tingkat kematangan hemik dan saprik memiliki pola yang hampir sama pada kelapa sawit umur 2, 5, dan 11 tahun.

Suhu tanah cenderung mengalami penurunan setiap bertambahnya kedalaman tanah. Pengaruh cuaca yang terjadi di permukaan tanah semakin berkurang. Radiasi matahari dan curah hujan teridentifikasi menjadi faktor yang paling berpengaruh terhadap suhu tanah. Semakin tinggi nilai radiasi matahari yang diterima oleh permukaan tanah, maka suhu tanah akan meningkat, sedangkan semakin tinggi curah hujan, akan diikuti dengan penurunan suhu tanah. Tutupan vegetasi berpengaruh terhadap jumlah radiasi matahari yang diterima permukaan tanah, semakin rapat tutupan vegetasi maka semakin rendah radiasi yang sampai ke permukaan tanah. Suhu tanah mengalami penurunan di kedalaman tanah 10 cm dengan rata-rata penurunan suhu sebesar 1°C. Sedangkan pada kedalaman tanah lebih dari 10 cm, suhu tanah cenderung konstan untuk tanaman kelapa

sawit umur 2 dan 11 tahun, sedangkan pada tanaman kelapa sawit umur 5 tahun cenderung meningkat.

Pola kelembaban tanah memiliki sifat kebalikan dari suhu tanah, semakin tinggi suhu tanah, kelembaban tanah akan berkurang (Gambar 2). Rata-rata kelembaban tanah (% volume) pada tanaman kelapa sawit umur 2 tahun, 5 tahun, dan 11 tahun masing-masing sebesar 48%, 47%, dan 47% volume. Perubahan kelembaban tanah terhadap kedalaman pada kelapa sawit umur 2 tahun, 5 tahun dan 11 tahun untuk tingkat kematangan hemik dan saprik memiliki pola yang sama.

Suhu tanah dan kelembaban tanah berkaitan satu sama lain dan memiliki besar nilai yang berbeda pada setiap kedalaman tanah. Menurut Karamina et al., (2017), suhu tanah dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor eksternal (radiasi matahari, curah hujan, kecepatan angin, dan kelembaban udara) dan faktor internal (kadar air tanah, struktur tanah, kandungan bahan organik, dan pH tanah). Faktor-faktor tersebut menyebabkan variasi suhu tanah secara diurnal (harian), dan variasi kelembaban tanah.



Gambar 2 Variasi nilai kelembaban tanah dan suhu tanah terhadap kedalaman tanah pada jenis gambut hemik dan saprik di lahan pertanaman kelapa sawit umur 2 tahun, 5 tahun, dan 11 tahun.

Pola kelembaban tanah juga dipengaruhi oleh interaksi tanaman dengan tanah (Garcia-Estringana et al., 2013). Semakin padat tutupan vegetasi, kelembaban tanah akan meningkat. Hasil penelitian Zheng et al., (2015) menunjukkan kelembaban tanah pada kedalaman 10 cm untuk tutupan vegetasi semak lebih rendah dibandingkan tutupan vegetasi pohon pinus dan pohon *ek*. Kelembaban tanah meningkat dengan penambahan kedalaman. Hal ini disebabkan oleh adanya proses evaporasi yang terjadi dipermukaan

tanah. Rata – rata kelembaban tanah di hutan rawa gambut tropis pada kedalaman 0 cm, 50 cm dan 100 cm masing-masing adalah 577 %massa, 891 %massa, dan 1070 %massa (Nuruddin et al., 2006).

Perbandingan Hasil Estimasi Suhu Permukaan dengan Data Pengukuran Lapangan

Ts memiliki pola yang sama untuk semua jenis kombinasi pengukuran (Tabel 3). Ts mengalami peningkatan pada pagi–siang hari kemudian me-

ngalami penurunan pada siang sampai sore. Nilai Ts bervariasi di setiap umur tanaman kelapa sawit dan tingkat kematangan gambut. Nilai Ts tanah gambut pada tingkat kematangan saprik lebih rendah dari pada hemik. Rata-rata Ts tertinggi terdapat di tanah hemik dengan kelapa sawit umur 2 tahun sebesar 39.6 °C dan terendah terdapat di tanah saprik pada kelapa sawit umur 5 tahun sebesar 27.8 °C.

Tutupan vegetasi dan sedikit tanaman LCC menyebabkan jumlah radiasi matahari yang diterima menjadi lebih besar dibandingkan dengan kelapa sawit

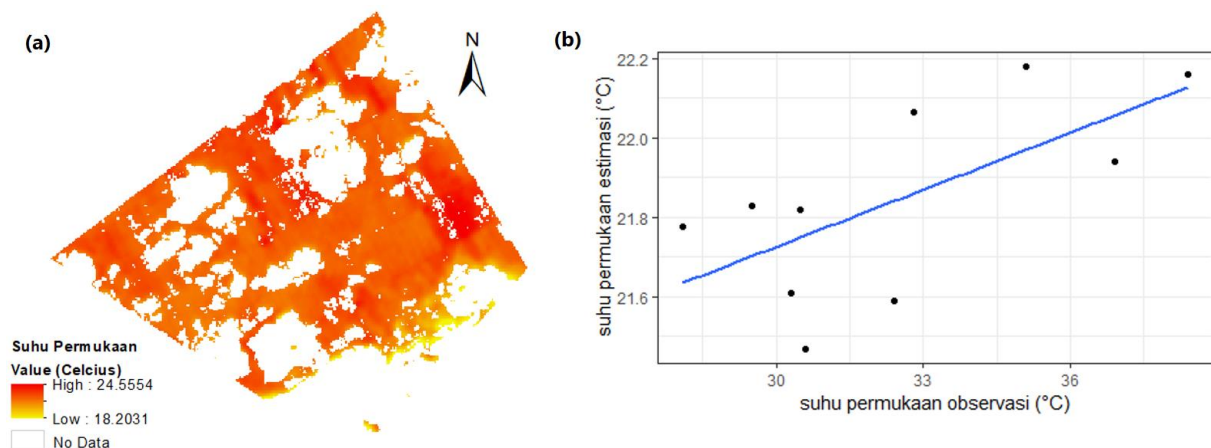
umur 5 dan 11 tahun. Jaya (2007) dalam Jauhiainen et al., (2014) beberapa wilayah di Kalimantan Tengah dengan tutupan lahan berbeda menunjukkan bahwa pengurangan tutupan vegetasi mampu meningkatkan rata-rata suhu tanah, yaitu 22.9 °C untuk hutan gambut, 26.7 °C hutan yang rusak, dan 30.2 °C untuk lahan pertanian terbuka. Rata-rata suhu tanah pada kedalaman 5 cm untuk tanaman *Acacia crassiorpa* siap panen sebesar 26.6 °C, sedangkan untuk wilayah yang sudah ditebang dan ditanam ulang sebesar 27.3 °C (Jauhiainen et al., 2014).

Tabel 3 Variasi suhu permukaan lahan gambut pada kisaran waktu pagi, siang, dan sore hari.

Kematangan gambut	Umur kelapa sawit (Tahun)	Pagi (°C)	Siang (°C)	Sore (°C)
Saprik	2	32.4	35.6	31.9
	5	23.3	35.5	29.1
	11	31.1	37.9	34.1
Hemik	2	32.7	45.9	40.3
	5	35.4	36.6	30.6
	11	29.4	33.8	33.0

Pengolahan data citra satelit menghasilkan sebaran suhu permukaan secara spasial pada wilayah kajian (Gambar 4a). Suhu permukaan rata-rata wilayah kajian untuk tutupan lahan kelapa sawit umur 2, 5 dan 11 tahun di tanah gambut saprik, masing-masing adalah 22.9 °C, 22.4 °C, dan 21.5 °C. Sedangkan tanah gambut hemik 22.3 °C, 22.1 °C, dan 21.8 °C. Kondisi area kelapa sawit umur 2 tahun untuk kedua jenis kematangan gambut memiliki nilai suhu permukaan yang tinggi berdasarkan hasil pengukuran langsung maupun hasil pengolahan citra satelit.

Suhu permukaan hasil pengolahan citra memiliki korelasi positif dengan suhu permukaan hasil pengukuran lapang. Hal ini ditunjukkan oleh gradien kemiringan garis regresi linier pada *scatter plot* bernilai positif (Gambar 4b). Kekuatan hubungan antara kedua data ditunjukkan oleh nilai r sebesar 0.67. Suhu permukaan hasil pengolahan citra Landsat 8 lebih rendah dari hasil pengukuran lapang dengan koefisien determinan (R^2) sebesar 0.43. Hal ini disebabkan oleh pengambilan data secara *in situ* dilakukan pada hari dan kondisi cuaca yang berbeda.



Gambar 3 Hasil estimasi suhu permukaan dari citra Landsat 8. (a) Sebaran nilai suhu permukaan di wilayah kajian (gradasi warna kuning-merah menunjukkan variasi suhu rendah-tinggi). (b) Perbandingan nilai estimasi terhadap nilai observasi suhu permukaan, menunjukkan hubungan linier antara kedua variabel (garis biru adalah garis regresi linier sederhana).

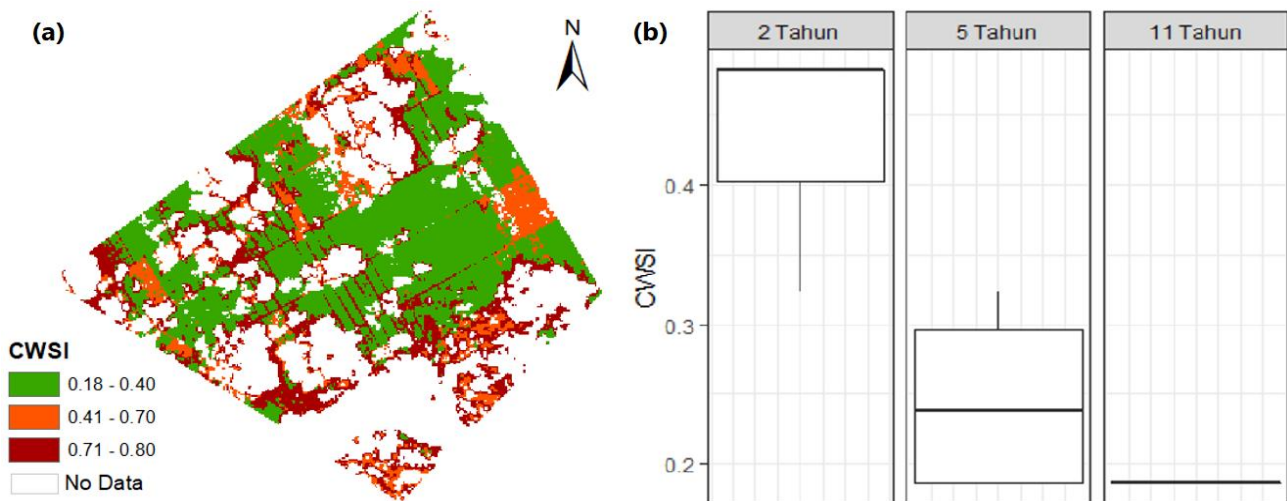
Crop Water Stress Index (CWSI)

CWSI adalah indeks kekeringan yang diturunkan dari komponen neraca energi. Sebaran nilai CWSI pada wilayah kajian sebesar 0.18 – 0.80 (Gambar 7a). Nilai CWSI pada tanaman sawit umur 2 tahun dan 5 tahun

memiliki rentang nilai CWSI sebesar 0.32 – 0.56 dan 0.19 – 0.73, sedangkan pada tanaman sawit umur 11 tahun memiliki nilai CWSI yang seragam yaitu sebesar 0.19. Sebaran CWSI bervariasi pada masing-masing umur tanaman kelapa sawit (Gambar 7b). Keragaman

tertinggi teridentifikasi pada sawit umur 5 tahun. Nilai rata-rata CWSI untuk tanaman sawit umur 2 tahun, 5

tahun, dan 11 tahun berturut-turut sebesar 0.44, 0.37, dan 0.19.



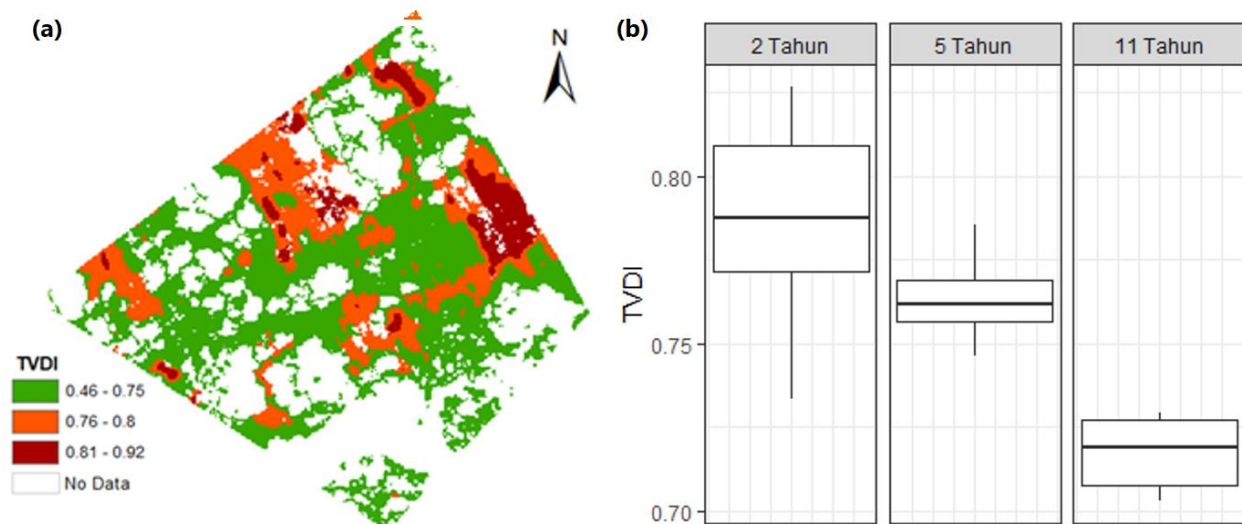
Gambar 4 Hasil perhitungan nilai CWSI. (a) Sebaran nilai CWSI secara spasial, dan (b) sebaran nilai setiap umur sawit di wilayah kajian menggunakan citra Landsat 8.

Nilai rata-rata ETp pada kelapa sawit umur 2, 5, dan 11 tahun masing-masing sebesar 5.4 mm/hari, 5 mm/hari, dan 5.2 mm/hari. Nilai CWSI memiliki hubungan searah dengan ETp, yaitu semakin tinggi ETp akan diikuti dengan peningkatan nilai CWSI. Nilai ETp rata-rata perkebunan kelapa sawit di wilayah kajian sebesar 5 mm/hari. Hal yang sama juga dinyatakan pada penelitian Harahap dan Darmosarkoro (1999).

Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)

Nilai TVDI pada wilayah kajian secara spasial berkisar antara 0.46 – 0.92 (Gambar 5a). Nilai TVDI

tertinggi teridentifikasi pada area kelapa sawit umur 2 tahun. Ekstraksi nilai TVDI pada wilayah kajian untuk tanaman sawit umur 2 tahun, 5 tahun, dan 11 tahun berkisar antara 0.73-0.83, 0.75-0.79, dan 0.70-0.73 (Gambar 5b). Rata-rata nilai TVDI mengalami penurunan tiap bertambahnya umur tanaman. Bagian *no data* merupakan tutupan awan pada data citra satelit landsat yang digunakan. Tutupan awan mengakibatkan bias yang tinggi pada data hasil pengolahan, sehingga perlu dihilangkan.



Gambar 5 Hasil perhitungan nilai TVDI. (a) Sebaran nilai TVDI secara spasial, dan (b) sebaran nilai setiap umur sawit di wilayah kajian menggunakan citra Landsat 8

Sebaran nilai TVDI bervariasi pada masing-masing kondisi kelapa sawit. TVDI tidak menyebar normal dan tidak terdapat nilai ekstrem (outliers). Lahan kelapa sawit umur 11 tahun memiliki keragaman nilai yang paling rendah, dengan selisih nilai maksimum

dan nilai minimum yaitu sebesar 0.3. Keragaman TVDI tertinggi ada di lahan kelapa sawit umur 2 tahun. Nilai rata-rata TVDI untuk tanaman sawit umur 2 tahun, 5 tahun dan 11 tahun mendekati nilai median masing-masing, yaitu 0.78, 0.76, dan 0.71.

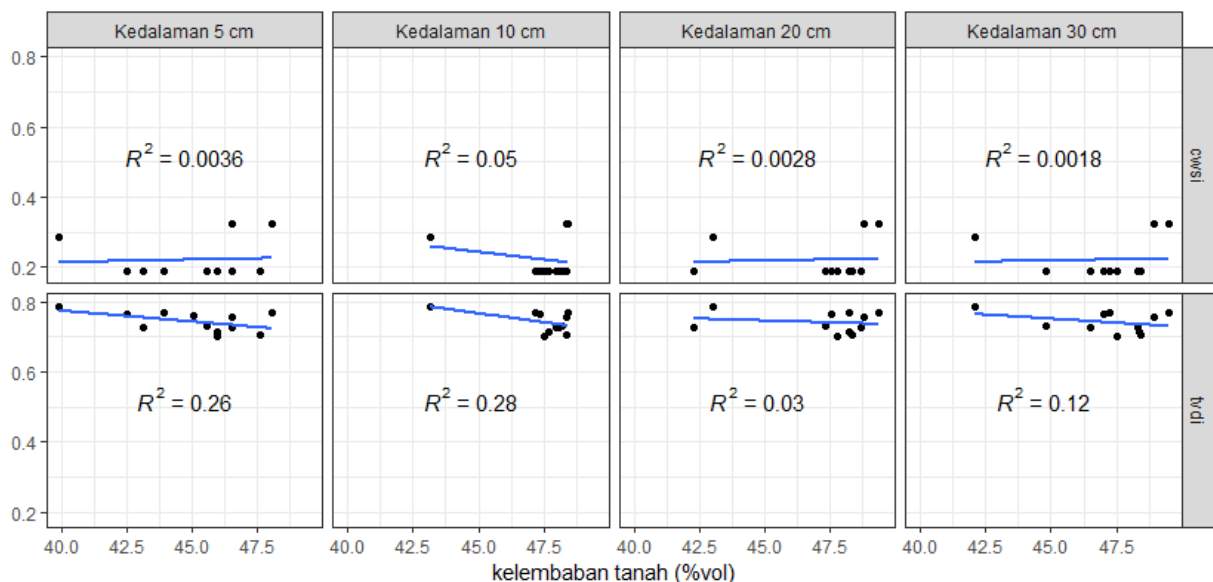
Perbandingan Indeks Kekeringan dengan Kelembaban Tanah

Nilai CWSI dan TVDI memiliki pola yang cenderung sama dalam menggambarkan kondisi kekeringan. Semakin tinggi nilai indeks kekeringan pada suatu area, menunjukkan kondisi area yang semakin kering. Kedua nilai indeks kekeringan menunjukkan kondisi yang lebih kering terjadi pada area tanaman sawit umur 2 tahun.

Selain itu, nilai korelasi (r) CWSI terhadap kelembaban tanah kedalaman 5 cm, 10 cm, 20 cm, dan 30 cm masing-masing sebesar 0.06, 0.22, 0.05, dan 0.04 (Gambar 8). Koefisien determinasi (R^2) tertinggi ditunjukkan pada kedalaman 10 cm yaitu sebesar 0.05. Hal ini menunjukkan bahwa CWSI untuk wilayah kajian berkorelasi kuat pada kedalaman 10 cm. Bai et al., (2017) menunjukkan nilai korelasi indeks kekeringan

pada kedalaman 10 cm lebih baik dari kedalaman 20 cm. Sedangkan nilai korelasi (r) TVDI terhadap kelembaban tanah kedalaman 5 cm, 10 cm, 20 cm, dan 30 cm masing-masing sebesar 0.5, 0.52, 0.17, dan 0.3 (Gambar 6).

Nilai CWSI cenderung lebih rendah daripada nilai TVDI untuk setiap titik lokasi pengambilan data. Penelitian Bai et al., (2017) menunjukkan bahwa rendahnya nilai CWSI dipengaruhi oleh lahan pertanian irigasi. Lokasi pengambilan data berada pada kisaran 110 - 200 m dari kanal diduga menyebabkan nilai CWSI pada wilayah kajian bernilai lebih rendah. Hubungan nilai TVDI dan CWSI pada setiap titik di wilayah kajian adalah positif dengan nilai R^2 sebesar 0.28. Nilai r sebesar 0.53 menunjukkan kekuatan hubungan kedua indeks relatif kuat, hal ini seperti yang dihasilkan oleh Bai et al., (2017).



Gambar 6 Perbandingan nilai korelasi antara indeks kekeringan terhadap nilai kelembaban tanah pada setiap level kedalaman tanah.

KESIMPULAN

Suhu tanah dan kelembaban tanah memiliki pola yang berbeda terhadap variasi kedalaman tanah. Setiap pertambahan kedalaman tanah, suhu tanah cenderung menurun sedangkan kelembaban tanah cenderung meningkat hingga konstan pada kedalaman tertentu. Nilai kedua parameter dipengaruhi oleh radiasi matahari, curah hujan, tutupan vegetasi dan tingkat kematangan gambut. Suhu tanah tertinggi terdapat pada lahan kelapa sawit umur 2 tahun dengan tutupan vegetasi yang rendah dan kelembaban tanah tertinggi juga terdapat pada area kelapa sawit berumur 2 tahun dengan tutupan vegetasi tumbuhan pakis dan LCC yang padat.

Wilayah kajian terbagi menjadi 3 jenis umur sawit, yaitu 2 tahun, 5 tahun, dan 11 tahun. Indeks kekeringan TVDI dan CWSI memiliki korelasi kuat dan

mampu menggambarkan kondisi kekeringan lahan gambut di wilayah kajian. Kedua indeks menunjukkan sebaran nilai tertinggi secara spasial terdapat pada kondisi kelapa sawit berumur 2 tahun. Nilai indeks tertinggi terdapat pada wilayah-wilayah dengan tingkat kepadatan vegetasi yang rendah atau wilayah tanah kosong, sedangkan untuk wilayah dengan tingkat vegetasi yang tinggi memiliki nilai indeks yang rendah. Korelasi TVDI terhadap kelembaban tanah lebih kuat dari pada korelasi CWSI terhadap kelembaban tanah. Korelasi TVDI dan CWSI terhadap kelembaban tanah tertinggi pada kedalaman 10 cm.

DAFTAR PUSTAKA

AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D., Hain, C.R., 2015. Remote sensing of drought: Progress, challenges

- and opportunities. *Reviews of Geophysics* 53, 452–480.
<https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements (No. No. 56). FAO, Rome, Italy.
- Bai, J., Yu, Y., Di, L., 2017. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 16, 389–397. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61302-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61302-8)
- BAI, J., YU, Y., Di, L., 2017. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture* 16, 389–397. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61302-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61302-8)
- Cammalleri, C., Rallo, G., Agnese, C., Ciraolo, G., Minacapilli, M., Provenzano, G., 2013. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. *Agricultural Water Management* 120, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.10.003>
- Campos, J.C., Sillero, N., Brito, J.C., 2012. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara–Sahel transition zone. *Journal of Hydrology* 464–465, 438–446. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.042>
- Chen, J., Jiang, H., Mao, L., Yu, Z., Whang, C., 2011. Estimating soil moisture using Temperature–Vegetation Dryness Index (TVDI) in the Huang-huai-hai (HHH) plain. *International Journal of Remote Sensing* 32, 1165–1177. <https://doi.org/10.1080/01431160903527421>
- Çolak, Y.B., Yazar, A., Çolak, İ., Akça, H., Duraktekin, G., 2015. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4, 372–382. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.042>
- Doerr, S.H., Santin, C., 2016. Global trends in wildfire and its impacts: perceptions versus realities in a changing world. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371, 20150345. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0345>
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K., Siddiqui, A.R., 2015. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 18, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>
- Field, R.D., van der Werf, G.R., Fanin, T., Fetzner, E.J., Fuller, R., Jethva, H., Levy, R., Livesey, N.J., Luo, M., Torres, O., Worden, H.M., 2016. Indonesian fire activity and smoke pollution in 2015 show persistent nonlinear sensitivity to El Niño-induced drought. *Proc Natl Acad Sci USA* 113, 9204. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524888113>
- Fisch, G., Tota, J., Machado, L.A.T., Silva Dias, M.A.F., da F. Lyra, R.F., Nobre, C.A., Dolman, A.J., Gash, J.H.C., 2004. The convective boundary layer over pasture and forest in Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 47–59. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0043-x>
- Flannigan, M., Cantin, A.S., de Groot, W.J., Wotton, M., Newbery, A., Gowman, L.M., 2013. Global wildland fire season severity in the 21st century. *Forest Ecology and Management* 294, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.022>
- Garcia-Estringana, P., Latron, J., Llorens, P., Gallart, F., 2013. Spatial and temporal dynamics of soil moisture in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, NE Spain). *Ecohydrology* 6, 741–753. <https://doi.org/10.1002/eco.1295>
- Gaveau, D.L.A., Salim, M.A., Hergoualc’h, K., Locatelli, B., Sloan, S., Wooster, M., Marlier, M.E., Molidena, E., Yaen, H., DeFries, R., Verchot, L., Murdiyarso, D., Nasi, R., Holmgren, P., Sheil, D., 2014. Major atmospheric emissions from peat fires in Southeast Asia during non-drought years: evidence from the 2013 Sumatran fires. *Scientific Reports* 4, 6112.
- Gu, Y., Brown, J.F., Verdin, J.P., Wardlow, B., 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters* 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- Harahap, I., Darmosarkoro, W., 1999. Pendugaan kebutuhan air untuk pertumbuhan kelapa sawit di lapang dan aplikasinya dalam pengembangan sistem irigasi. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit* 7, 87–104.
- Hayasaka, H., Noguchi, I., Putra, E.I., Yulianti, N., Vadrevu, K., 2014. Peat-fire-related air pollution in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Pollution* 195, 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.031>
- Henderson, S.B., Johnston, F.H., 2012. Measures of forest fire smoke exposure and their associations with respiratory health outcomes. *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology* 12.

- Hirano, T., Kusin, K., Limin, S., Osaki, M., 2014. Carbon dioxide emissions through oxidative peat decomposition on a burnt tropical peatland. *Global Change Biology* 20, 555–565. <https://doi.org/10.1111/gcb.12296>
- Huijnen, V., Wooster, M.J., Kaiser, J.W., Gaveau, D.L.A., Flemming, J., Parrington, M., Inness, A., Murdiyarso, D., Main, B., van Weele, M., 2016. Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific Reports* 6, 26886.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr., P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17, 1133–1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- Jauhainen, J., Kerojoki, O., Silvennoinen, H., Limin, S., Vasander, H., 2014. Heterotrophic respiration in drained tropical peat is greatly affected by temperature—a passive ecosystem cooling experiment. *Environmental Research Letters* 9, 105013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105013>
- Karamina, H., Fikrinda, W., Murti, A., 2017. Kompleksitas pengaruh temperature dan kelembaban tanah terhadap nilai pH tanah di perkebunan jambu biji varietas kristal (*Psidium guajava* L.) Bumijati, Kota Baru. *Jurnal Kultivasi* 16, 430–434.
- Kelly, L.T., Bennett, A.F., Clarke, M.F., McCarthy, M.A., 2015. Optimal fire histories for biodiversity conservation. *Conservation Biology* 29, 473–481. <https://doi.org/10.1111/cobi.12384>
- Knorr, W., Jiang, L., Arneth, A., 2016. Climate, CO2 and human population impacts on global wildfire emissions. *Biogeosciences* 13, 267–282. <https://doi.org/10.5194/bg-13-267-2016>
- Liang, L., ZHAO, S., QIN, Z., HE, K., CHEN, C., LUO, Y., ZHOU, X., 2014. Drought Change Trend Using MODIS TVDI and Its Relationship with Climate Factors in China from 2001 to 2010. *Journal of Integrative Agriculture* 13, 1501–1508. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60813-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60813-3)
- Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J.S., McDowell, N.G., Running, S.W., 2012. A Remotely Sensed Global Terrestrial Drought Severity Index. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 94, 83–98. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00213.1>
- Nursyamsi, D., Noor, M., Maftu'ah, E., 2016. Peatland Management for Sustainable Agriculture, in: Osaki, M., Tsuji, N. (Eds.), *Tropical Peatland Ecosystems*. Springer Japan, Tokyo, pp. 493–511. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55681-7_34
- Nuruddin, A.A., Leng, H.M., Basaruddin, F., 2006. Peat moisture and water level relationship in a tropical peat swamp forest. *Journal of Applied Sciences* 6, 2517–2519.
- Osaki, M., Tsuji, N., 2016. *Tropical Peatland Ecosystem*. Springer-Vwerlag, Berlin, Germany.
- Reddy, A.D., Hawbaker, T.J., Wurster, F., Zhu, Z., Ward, S., Newcomb, D., Murray, R., 2015. Quantifying soil carbon loss and uncertainty from a peatland wildfire using multi-temporal LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 170, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.017>
- Reid, C.E., Brauer, M., Johnston, F.H., Jerrett, M., Balmes, J.R., Elliott, C.T., 2016. Critical Review of Health Impacts of Wildfire Smoke Exposure. *Environmental Health Perspectives* 124, 1334–1343. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409277>
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79, 213–224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
- Silveira, J.M., Louzada, J., Barlow, J., Andrade, R., Mestre, L., Solar, R., Lacau, S., Cochrane, M.A., 2016. A Multi-Taxa Assessment of Biodiversity Change After Single and Recurrent Wildfires in a Brazilian Amazon Forest. *Biotropica* 48, 170–180. <https://doi.org/10.1111/btp.12267>
- Sun, Y.-J., Wang, J.-F., Zhang, R.-H., Gillies, R.R., Xue, Y., Bo, Y.-C., 2005. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology* 80, 37–48. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0079-y>
- Taufik, M., Torfs, P.J.J.F., Uijlenhoet, R., Jones, P.D., Murdiyarso, D., Van Lanen, H.A.J., 2017. Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics. *Nature Climate Change* 7, 428.
- Thorburn, C.C., Kull, C.A., 2015. Peatlands and plantations in Sumatra, Indonesia: Complex realities for resource governance, rural development and climate change mitigation. *Asia Pacific Viewpoint* 56, 153–168. <https://doi.org/10.1111/apv.12045>
- Turetsky, M.R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G.R., Watts, A., 2014. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience* 8, 11.
- USGS, 2016. *Landsat 8 (L8) Data User Handbook version 2.0*.
- wiweka, 2014. Pola suhu permukaan dan udara menggunakan citra satelit landsat multitemporal. *Ecolab* 8, 1–52.
- Yustiawati, Kihara, Y., Sazawa, K., Kuramitz, H., Kurasaki, M., Saito, T., Hosokawa, T., Syawal, M.S.,

- Wulandari, L., Hendri I, Tanaka, S., 2015. Effects of peat fires on the characteristics of humic acid extracted from peat soil in Central Kalimantan, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 2384–2395. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2929-1>
- Zhang, A., Jia, G., 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 134, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>
- Zheng, H., Gao, J., Teng, Y., Feng, C., Tian, M., 2015. Temporal Variations in Soil Moisture for Three Typical Vegetation Types in Inner Mongolia, Northern China. *PLOS ONE* 10, e0118964. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118964>